

Adrian Mlot
Marian Łukaniszyn
Politechnika Opolska
Mariusz Korkosz
Politechnika Rzeszowska

WPŁYW EFEKTU ZBLIŻENIOWEGO I NASKÓRKOWOŚCI NA STRATY MOCY W UZWOJENIU SILNIKA ELEKTRYCZNEGO

INFLUENCE OF A PROXIMITY EFFECT AND A SKIN EFFECT ON COPPER LOSS IN AN ELECTRICAL MOTOR

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę strat mocy w miedzi wywołanych efektem zbliżeniowym oraz naskórkowością przy sinusoidalnym wymuszeniu prądowym o niskich i wysokich częstotliwościach. Zbudowane dwuwymiarowe (2D) i trójwymiarowe (3D) modele obliczeniowe w programie wykorzystującym metodę elementów skończonych (MES) do obliczeń pola magnetycznego posłużyły do pokazania wpływu efektu naskórkowości oraz efektu zbliżeniowego na straty mocy w uzwojeniu z uwzględnieniem połączeń czołowych. W niniejszej pracy zbadano wpływ połączeń czołowych na wielkość strat mocy w miedzi. Dodatkowo zbadano wpływ rozmieszczenia uzwojeń o przekroju kołowym w żłobku na straty w miedzi maszyny. Do przedstawienia wielkości strat mocy w miedzi przy różnych częstotliwościach uzwojenia zasilanego ze źródła prądowego wyznaczono stosunek rezystancji przy prądzie zmiennym do rezystancji przy prądzie stałym.

Abstract: In this paper three-dimensional (3D) and two-dimensional (2D) finite element analysis was applied to calculate copper losses and iron losses in the armature winding at high frequency sinusoidal current. To demonstrate the amount of copper loss resistance ratio of ac resistance and dc resistance was calculated. This paper focuses on the ac copper loss caused by circulating current effects in electrical machines. There are two different phenomena that lead to additional ac losses. First is a skin effect and the second one is the proximity effect. A skin effect is the tendency for high-frequency current to flow on the external surface of a conductor and can be mitigated through the use smaller conductor strands. The proximity effect is the tendency for current to flow in other undesirable patterns that form localised current loops or concentrated distributions due to the presence of a magnetic field generated by nearby conductors [10, 11].

Słowa kluczowe: straty w miedzi, straty w żelazie, efekt zbliżeniowy, zjawisko naskórkowości

Keywords: copper losses, iron losses, proximity effect, skin effect

1. Wstęp

Redukcja kosztów eksploatacji maszyny elektrycznej wymaga znajomości strat mocy silnika. Sprawność silnika elektrycznego można zwiększyć ograniczając straty energii zamienianej w ciepło. Głównym tematem niniejszej pracy będzie analiza strat w miedzi stojana maszyny. Wielkość strat w miedzi jest proporcjonalna do kwadratu natężenia prądu i rezystancji przewodnika. Straty w uzwojeniach zmieniają się w zależności od obciążenia silnika oraz w wyniku zmiany rezystancji uzwojenia wynikłej ze zmiany nierównomiernego rozkładu prądu w uzwojeniu [1, 2] oraz wzrostu rezystancji na skutek nagrzewania się uzwojenia.

W maszynach wysokoobrotowych np. z magnesami trwałymi typu PMSM uzwojenia stojana są zasilane prądem przemiennym o

częstotliwości znacznie większej niż 50 Hz. Przy wysokich częstotliwościach zasilania w uzwojeniu stojana silnika występuje wzajemne oddziaływanie pola magnetycznego i pola elektrycznego. Prąd przemienny w zwojach miedzianych jest źródłem zmiennego pola magnetycznego, które indukuje zmienne, przeciwnie skierowane pole elektryczne. To pole jest odpowiedzialne za powstawanie prądów wtórnych tzn. prądów płynących w przewodzie w przeciwnym kierunku względem prądu głównego. Prądy wtórne redukują wartość pola magnetycznego oraz zmieniają gęstość prądu. Dodatkowo pole magnetyczne wytworzone przez prąd wokół przewodnika oddziałuje na przewodniki sąsiednie, wnikając do nich jako fala elektromagnetyczna, indukując na powierzchni sąsiednich przewodników prądy i zwiększając w ten

sposób wartość przepływającego prądu. Zjawiska te są źródłem występowania tzw. efektu naskórkowości (ang. *Skin effect*) oraz efektu zbliżeniowego (ang. *Proximity effect*) który nazywany jest również efektem sąsiedztwa [1, 2, 3]. Zjawiska te mają istotny wpływ na wartość strat mocy w uzwojeniu a znajomość ich jest niezbędna do prawidłowego ułożenia zwojów w żłobkach silnika. Zwiększanie się efektu tych zjawisk w uzwojeniu wpływa na wzrost rezystancji uzwojeń [4, 5].

W celu ograniczenia zjawiska naskórkowości w przetwornikach energii stosuje się różnego rodzaju uzwojenia, które poprawiają sprawność maszyn pracujących przy wysokich częstotliwościach [1, 2, 6, 7]. Aby ograniczyć straty mocy w miedzi, z drutów emaliowanych tworzy się wiązkę drutów z wielu bardzo cienkich wzajemnie odizolowanych od siebie przewodników. Średnica pojedynczego drutu, z którego wykonuje się wiązkę zależy przede wszystkim od głębokości wnikania prądu na powierzchni drutu miedzianego [1, 2, 9]. Średnica drutu powinna być mniejsza od głębokości wnikania δ . Głębokość ta w pojedynczym drucie miedzianym, zależy od częstotliwości zmiany prądu (f), przenikalności (μ) oraz konduktywności (σ) przewodnika i można ją obliczyć wg. zależności (1) [9].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu_0\mu_r\sigma}} \quad (1)$$

Efekt naskórkowości powoduje, że przy dużych częstotliwościach prąd nie płynie całym przekrojem drutu, ale tylko po jego warstwie zewnętrznej, przylegającej do powierzchni i grubość tej warstwy zmniejsza się wraz ze wzrostem częstotliwości (1). Jest to zatem odległość głębokości wnikania liczona do środka przewodnika na jakiej amplituda pola zmniejszy się e (podstawa algorytmu naturalnego) razy w stosunku do wartości na powierzchni [1, 2].

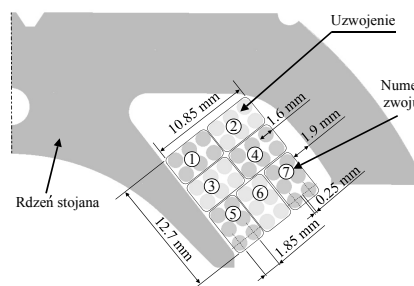
Zastosowanie np. maszyny wysokoobrotowej w układach które z różnego powodu wymagają stosowania napięć np. bezpiecznych wymaga analizy strat mocy w miedzi [8], z uwagi na dużą częstotliwość prądu w uzwojeniach stojana oraz konieczność stosowania uzwojeń wielodrutowych. Efekt naskórkowości, którego wpływ rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości, zwiększa efektywną rezystancję przewodnika i

powoduje wzrost temperatury w jego wnętrzu. Natomiast wysoka temperatura, która jest podstawową i jedną z najważniejszych wielkości fizycznych może doprowadzić do zniszczenia uzwojenia. Dlatego też przy projektowaniu maszyn elektrycznych należy uwzględnić badania termiczne [10, 11, 12].

2. Badany silnik komutatorowy

2.1. Stojan silnika komutatorowego

Do przeprowadzenia badań strat mocy w miedzi i w żelazie użyto rdzenia silnika komutatorowego z dwoma biegunami stojana z nawiniętym uzwojeniem o przekroju kołowym, w którym przyjęto długość pakietu rdzenia równą 120 mm. Na rysunku 1 przedstawiono $\frac{1}{4}$ przekroju osiowego rdzenia stojana i cewki o siedmiu zwojach z których każdy jest złożony z sześciu drutów połączonych równoległe i umieszczonych w przestrzeni żłobkowej.



Rys. 1. Przekrój osiowy rdzenia stojana i cewki

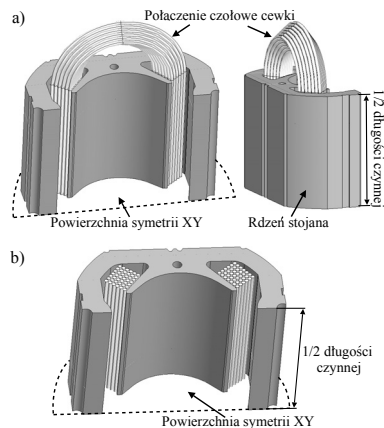
W obliczeniach założono drut cewki o średnicy $\varnothing 1,6$ mm. Rdzeń stojana wykonano z pakietu blachy M470-50A o grubości $d = 0,5$ mm, gęstości materiału $\gamma = 7760$ kg/m³ i konduktywności elektrycznej $\sigma = 2,5641 \times 10^6$ 1/Ω·m. Natomiast współczynnik pakietowania przyjęto jako $k_f = 0,95$.

2.2. Modele obliczeniowe

Do przeprowadzenia obliczeń strat w miedzi przy uwzględnieniu połączeń czołowych użyto programu 3D bazującego na metodzie elementów skończonych [9]. Na rysunku 2a pokazano 3D model obliczeniowy. W celu analizy wpływu połączeń czołowych na rozptył strumienia magnetycznego w silniku, a tym samym wpływu na straty mocy dokonano porównania obliczeń uzyskanych z modelu 3D i modelu 2D - brak połączeń czołowych (rys.2b).

Przestrzeń obliczeniową ograniczono tylko do jednego bieguna rdzenia stojana z nawiniętą jedną cewką (rys.2a, rys.2b). W modelu obliczeniowym pominięto wpływ strumienia

wytwarzanego przez cewkę z bieguna sąsiedniego. W badanym modelu zastosowano symetrię geometrii na powierzchni XY tj. $\frac{1}{2}$ długości czynnej rdzenia stojana.



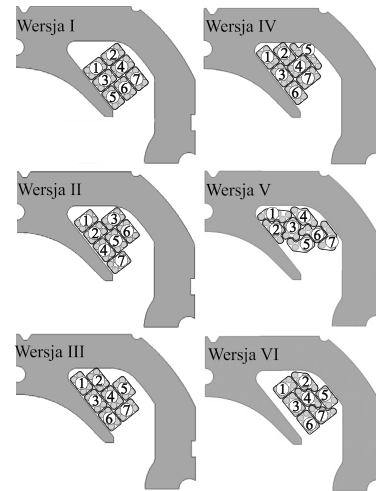
Rys.2. 3D (a) i 2D (b) model obliczeniowy badanego stojana do wyznaczenia strat mocy

Do wyznaczenia strat mocy w uzwojeniu zastosowano rozwiązanie stanu ustalonego pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez prądy sinusoidalne o wysokich częstotliwościach. Pole sinusoidalne lub harmoniczne zmienia się razem z prędkością kątową (rad/s) sinusoidalnego wzbudzenia (z pulsacją ω) [9]. Aby dokonać poprawnego oszacowania wyników obliczeń w regionach w których występuje efekt naskórkowości przy sinusoidalnych rozkładach przestrzennych pola magnetycznego, na powierzchni przewodników miedzianych należy zbudować siatkę o dwóch warstwach elementów (drugiego rzędu). Jeśli efekt naskórkowości jest wyraźny to pojawia się problem siatki dyskretyzacyjnej. Wiąże się to z koniecznością zwiększenia liczby elementów i węzłów siatki w uzwojeniu. Wyraźny efekt naskórkowości występuje dla zbyt małej głębokości wnikania δ w porównaniu do promienia przewodnika miedzianego oraz gdy pole magnetyczne głównie przenika powierzchnię określoną przez δ .

2.3. Rozmieszczenie uzwojeń w stojanie

Aby zredukować straty mocy w uzwojeniu stosuje się odpowiednie metody ich redukcji. Do jednych z nich należy odpowiednie ułożenie przewodników w przestrzeni żłbkowej. Na rysunku 3 pokazano wybrane ułożenia zwojów w przestrzeni żłbkowej, dla których wykonano obliczenia strat mocy w miedzi. W wersji I zwoje umieszczono centralnie w żłbku. Natomiast wersje II, III, IV i V reprezentują

uzwojenie, które zostało umieszczone w głąb żłbka. W wersji VI uzwojenia umieszczono z dala od bieguna twornika i bliżej otwarcia żłbka.



Rys.3. Przykładowe rozmieszczenia zwojów w przestrzeni żłbkowej

3. Straty mocy w stojanie

3.1 Straty mocy w miedzi

W zasilonym uzwojeniu przepływający prąd wydziela moc strat w postaci ciepła. Straty te wyznaczono na podstawie prawa Joule'a jako iloczyn natężenia pola elektrycznego E i gęstości prądu J :

$$P_{cu} = \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = \rho \iiint_V \vec{J}^2 dV = l \rho \iint_S J^2 dS \quad (2)$$

Straty P_{cu} przy zasileniu uzwojenia prądem stałym o wartości I zależą od kwadratu tego prądu oraz rezystancji R_{dc} . Przy założeniu stałej temperatury uzwojeń rezystancję stałoprądową R_{dc} można zapisać następująco:

$$R_{dc} = P_{dc} / I^2 \quad (3)$$

W przypadku zasilenia uzwojenia prądem zmiennym o amplitudzie I (ang. *alternating current* - *ac*) i częstotliwości większej niż $f = 10\text{Hz}$ w przewodnikach występuje zjawisko zagęszczania prądu przy ich zewnętrznej powierzchni i tym samym rezystancja uzwojenia ulega zmianie. W takich warunkach rezystancję można zapisać poniższym wzorem:

$$R_{ac} = P_{ac} / I^2 \quad (4)$$

Z zależności (3) i (4) można otrzymać:

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \quad (5)$$

Do opisu wielkości strat w miedzi, spowodowanych przez prądy wirowe, używa się stosunku zmian mocy uzwojenia przy prądzie zmiennym o wysokich częstotliwościach (P_{ac}) do zmian mocy w miedzi przy prądzie stałym (P_{dc}). W obliczeniach założono, że rozkład prądu do częstotliwości 10Hz w uzwojeniu jest równomierny i wartość strat mocy w miedzi wynosi P_{dc} .

W niniejszej pracy wykonano rozważania dotyczące analizy strat mocy w miedzi przy temperaturze pracy uzwojeń równej 20°C i dla tej temperatury przyjęto rezystywność miedzi. W celu otrzymania strat mocy dla innej temperatury pracy, która wzrasta w uzwojeniu np. z powodu wzrostu częstotliwości, można wykonać przeskalowanie obliczeń poprzez zastosowanie dodatkowej zmiennej zależnej od temperatury [10, 11].

3.2 Straty mocy w żelazie

Poprawne wyznaczenie strat mocy w żelazie wymaga uwzględnienia w obliczeniach danych dotyczących współczynnika strat wynikłych z pętli histerezy (k_h), współczynnika strat dodatkowych (k_e) oraz współczynnika pakietowania (k_f) [13, 14, 15]. Średnie straty mocy w objętości spakietowanego rdzenia stojana zostały wyznaczone przy użyciu równania (6), dla zmieniającego się sinusoidalnie pola magnetycznego o określonej częstotliwości f [9].

$$P_{Fe} = \iiint_V \left(k_h B^2 f + \frac{\sigma \pi^2 d}{6} (Bf)^2 + k_e (Bf)^{3/2} \cdot 8,67 \right) k_f dV \quad (6)$$

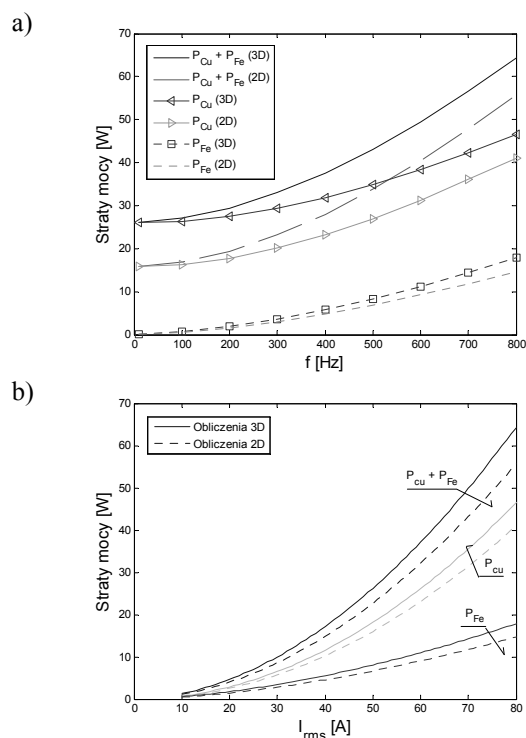
gdzie: $k_h=143 \text{ Ws}/\text{T}^2/\text{m}^3$; $k_e=2,6 \text{ W}/(\text{Ts}^{-1})^{3/2}/\text{m}^3$; $k_f=0,95$; B – wartość maksymalna indukcji magnetycznej, d – grubość pojedynczej blachy stojana (0,5mm). Współczynniki te wyznaczono dla przyjętej charakterystyki magnesowania blachy M470-50A [16].

3.3 Wyniki obliczeń strat mocy

W obliczeniach mocy uwzględniono straty mocy w miedzi oraz w żelazie, natomiast pominięto straty związane z układem zasilającym. Wyniki strat miedzi dotyczą tylko jednej cewki, natomiast obliczenia strat w żelazie odniesione są do połowy objętości twornika (rys.2a-b).

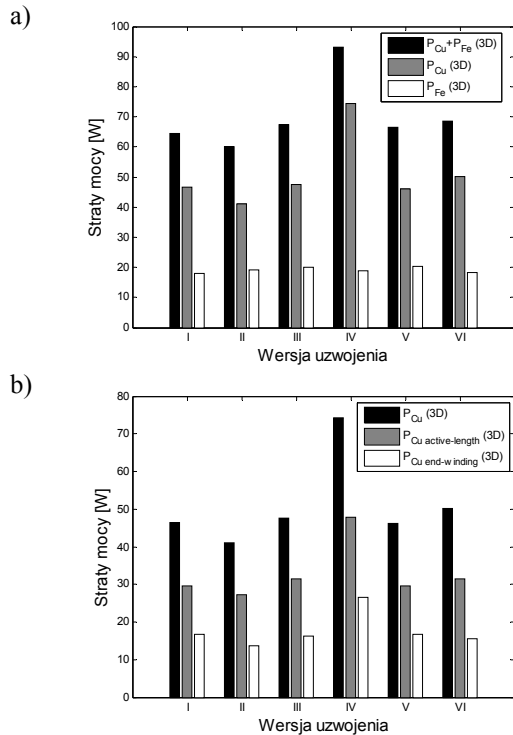
Na rysunku 4a-b pokazano podział strat mocy na straty w miedzi oraz w żelazie, w funkcji częstotliwości i prądu dla wersji I uzwojenia.

Przy wzroście częstotliwości i przy odpowiednio dużym prądzie zasilania (w rozpatrywanym przypadku wartość skuteczna prądu wynosiła 80A różnice strat mocy pomiędzy modelem 2D i 3D zwiększają się ze względu na połączenia czołowe, których wpływ pola magnetycznego na rdzeń stojana wzrasta (rys. 4a). W rozpatrywanym prototypie silnika średnia rozbieżność całkowitych strat mocy ($P_{Cu} + P_{Fe}$) pomiędzy modelem 2D i 3D wyniosła ~24%. Przy małym wymuszeniu prądowym wpływ połączeń czołowych nawet przy wysokich częstotliwościach będzie znacznie mniejszy (rys. 4b).



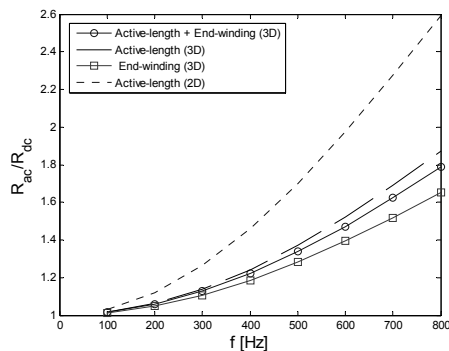
Rys.4. Obliczenia 2D i 3D strat mocy w miedzi i żelazie dla wersji I uzwojenia przy zasilaniu prądem o wartości skutecznej 80A w funkcji częstotliwości (a) oraz prądu dla $f=800\text{Hz}$ (b)

Obliczenia całkowitych strat mocy modelu 3D (suma strat w miedzi i żelazie) z uwzględnieniem połączeń czołowych dla różnych wersji rozmieszczenia uzwojeń w żłobku zobrazowano na rys. 5a. Natomiast na rysunku 5b pokazano podział strat w miedzi w połączeniach czołowych ($P_{Cu_end-winding}$) oraz w żłobku ($P_{Cu_active-length}$). Umieszczenie każdego przewodnika miedzianego względem sąsiedniego ma istotny wpływ na straty mocy w miedzi i są one największe w tej części uzwojenia, która jest w najbliższym otoczeniu ferromagnetyka oraz bliżej otwarcia żłobka.



Rys.5. Obliczenia 3D strat mocy w żelazie (a) i miedzi (b) dla różnych wersji rozmieszczenia zwojów w przestrzeni żłobkowej przy zasileniu prądem o wartości skutecznej 80A i $f=800\text{Hz}$

Stosunek zmian rezystancji R_{ac} do R_{dc} w funkcji częstotliwości reprezentujący wzrost wielkości strat mocy w miedzi pokazano na rysunku 6.



Rys.6. Stosunek zmiany rezystancji w funkcji częstotliwości dla wersji I uzwojenia przy zasileniu prądem o wartości skutecznej 80 A

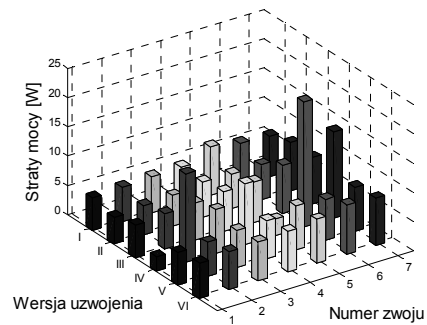
W tabeli I zestawiono stosunek rezystancji R_{ac}/R_{dc} przy zasileniu cewki prądem o wartości skutecznej 80A i o częstotliwości 800Hz dla różnych wersji umiejscowienia uzwojeń w żłobku.

Tabela I. Obliczenia 3D zmiany rezystancji R_{ac} do R_{dc} dla 80A i 800Hz

Wersja uzwojenia	R_{ac}/R_{dc}		
	P_{Cu}	$P_{Cu \text{ active-length}}$	$P_{Cu \text{ end-winding}}$
I	1.79	1.87	1.65
II	1.62	1.72	1.46
III	1.90	1.98	1.77
IV	2.99	3.01	2.97
V	1.81	1.86	1.73
VI	1.91	1.98	1.80

W zależności od wersji ułożenia zwojów w żłobku straty mocy w miedzi połączeń czołowych ($P_{Cu \text{ end-winding}}$) w stosunku do całkowitych strat mocy w miedzi ($P_{Cu}=P_{Cu \text{ active-length}}+P_{Cu \text{ end-winding}}$) stanowią 23% ÷ 28%. Dla wersji II uzwojenia otrzymano najmniejszy wzrost rezystancji ($R_{ac}/R_{dc} = 1.62$).

Na rysunku 7 zobrazowano obliczenia 3D strat mocy w miedzi z uwzględnieniem połączeń czołowych uzwojenia dla poszczególnych zwojów.



Rys.7. Straty mocy w miedzi w poszczególnych zwojach z uwzględnieniem połączeń czołowych dla wersji I uzwojenia dla wartości skutecznej prądu równej 80A i $f=800\text{Hz}$ (obliczenia 3D)

W badanych wersjach rozmieszczenia uzwojeń w żłobku (za wyjątkiem wersji IV uzwojenia) odnotowano najmniejsze straty mocy dla zwojów 1÷4 umiejscowionych w tylnej części żłobka z dala od szczeliny powietrznej. Natomiast dla zwojów o numerach 5÷7, które są najbliżej otwarcia żłobka, straty mocy w miedzi znacząco wzrastają.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono obliczenia strat mocy w uzwojeniu i żelazie przy użyciu modelu 2D i 3D opartego na MES [9]. Obliczenia wykonano na przykładzie pakietu stojana silnika komutatorowego zasilanego

prądem sinusoidalnym o częstotliwościach z zakresu 10÷800Hz. Obliczenia 3D przedstawiają istotny wpływ połączeń czołowych na straty mocy w uzwojeniu i żelazie. Straty w miedzi były wynikiem wpływu efektu zbliżeniowego oraz naskórkowości [1, 2]. Ze względu na mniejszą średnicę drutu użytego w cewce w porównaniu z głębokością wnikania δ , efekt zbliżeniowy będzie dominujący w porównaniu z efektem naskórkowości. Wielkość strat mocy generowanych w miedzi będzie uzależniona również od kształtu przekroju osiowego żłobka, który jest determinowany przez kształt ferromagnetyka otaczającego uzwojenie, a także od wielkości otwarcia żłobka.

Jak wykazały obliczenia zwoje umieszczone w przedniej części żłobka (tj. w pobliżu otwarcia żłobka) są dominujące w porównaniu ze stratami mocy jakie się wytwarzają z dala od otwarcia żłobka.

5. Literatura

- [1] Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V.: *Design of rotating electrical Machines*, 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [2] Kazimierzczuk M.K.: *High-frequency magnetic components*, 2009 A John Wiley and Sons, Ltd.
- [3] Zheng P., Nordlund E., Thelin P., Sadarangani C.: *Investigation of the winding current distribution in a 4-quadrant-transducer prototype machine*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 5, May 2005, pp. 1972-1975.
- [4] Sullivan Charles R.: *Computationally efficient winding loss calculation with multiple windings, arbitrary waveforms, and two-dimensional or three-dimensional field geometry*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 142-150.
- [5] Spang M., Albach M.: *Optimized winding layout for minimized proximity losses in coils with rod cores*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 7, July 2008, pp. 1815-1821.
- [6] Reddy P.B, Jahns T.M., Bohn T.P.: *Transposition effects on bundle proximity losses in high-speed PM machines*, Power Electronics Conference, ECCE, 20-24 September 2009, pp. 1919-1926.
- [7] Reddy P.B, Jahns T.M.: *Analysis of bundle losses in high speed machines*, Energy Conversion Congress and Exposition, IPEC, 21-24 June 2010, pp. 2181-2188.
- [8] Reddy P.B, Jahns T.M., Bohn T.P.: *Modeling and analysis of proximity losses in high-speed surface permanent magnet machines with concentrated windings*, Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, 12-16 September 2010, pp. 996-1003.
- [9] Flux 10.3 Documentation, 2009, Cedrat Group.
- [10] Wrobel R., Mlot A., Mellor P.H.: *Contribution of end-winding proximity losses to temperature variation in electromagnetic devices*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 2, February 2012, pp.848-857.
- [11] Wrobel R., Mlot A., Mellor P.H.: *Investigation of end-winding proximity losses in electromagnetic devices*, XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM, September 2010, Rome, pp.1-6.
- [12] Islam M.J., Khang H.V., Repo A.K., Arkkio A.: *Eddy-current loss and temperature rise in the form-wound stator winding of an inverter-fed cage induction motor*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 8, August 2010, pp. 3413- 3416.
- [13] Ionel D.M., Popescu M., Cossar C. et al.: *A general model for estimating the laminated steel losses under PWM voltage supply*, IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 46, No. 4, 2010, pp. 1389-1396.
- [14] Boglietti A., Cavagnino A., Ionel D.M., Popescu M., Staton D.A., Vaschetto S.: *A general model to predict the iron losses in PWM inverter-fed induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 5, September/October 2010, pp.1882-1890.
- [15] Ionel D.M., Popescu M., Dellinger S.J., Miller T.J.E., Heideman R.J., McGlip M.I.: *On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 3, May/June 2006, pp.658-667.
- [16] Mlot A., Korkosz M., Lukaniszyn M.: *Iron loss and eddy-current loss analysis in a low-power BLDC motor with magnet segmentation*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 61(1), 2012, pp.33-46.

Autorzy

dr inż. Adrian Młot, 77 4498008, a.mlot@po.opole.pl

prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn, 77 4498007, m.lukaniszyn@po.opole.pl

Politechnika Opolska, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

dr inż. Mariusz Korkosz, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12, 17 8544777, mkosz@prz.edu.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Jan Zawilak